一种基于能量-信息转换的智能测度

王晓峰
（上海海事大学信息工程学院，上海市浦东新区，201106）
xfwang@shmtu.edu.cn

摘　要：什么是智能？这个问题是人工智能的核心关键问题之一，但是至今没有一个公认的定义。本文从智能与生命的关系视角提出：智能是生物体的基本能力和特征属性，是一种尽量用最小能量实现最大信息量，通过信息处理来适应环境、维持存在的能力。在此基础上，提出了智能是物质能量与信息间的转换能力这一新观点，进一步提出了智能的测度计算方法、平均智能、综合智能等新概念，最后讨论了物质、能量与信息的定量转换关系，指出了智能的上界和能量转换为信息的下界，为便于实际应用，进一步给出一个无量纲的智能测度计算公式。为智能系统定量分析智能的高低给出了可行的计算方法。

关键词：物质，能量与信息的关系，智能，智能测度
分类号：TP393

An intelligent measure based on energy-information conversion

WANG Xiaofeng
（School of Information Engineering, Shanghai Maritime University,
Pudong New Area, Shanghai, 201106）
xfwang@shmtu.edu.cn

Abstract: What is intelligence? is one of the core questions of artificial intelligence, but there is no accepted definition. From the perspective of the relationship between intelligence and life, this paper proposes that intelligence is the basic ability and characteristic attribute of living organisms, and it is the ability to achieve the maximum amount of information with the minimum energy as much as possible, and to adapt to the environment and maintain existence through information processing. On this basis, this paper puts forward a new view that intelligence is the conversion ability between material energy and information, further puts forward new concepts such as the measurement calculation method of intelligence, average intelligence, and comprehensive intelligence, and finally discusses the quantitative conversion relationship between matter, energy and information, points out the upper bound of intelligence and the lower bound of energy conversion into information, and further gives a dimensionless calculation formula for intelligence measurement in order to facilitate practical application. A feasible calculation method is given for the quantitative analysis of the intelligence of the intelligent system...

Keywords: mass, the relationship between energy and information, intelligence, intelligent measurement

1. 引言

毫无疑问，人工智能是当前最为热门的话题之一。但是什么是智能？却没有一个公认的定义，有人说思维是智能，有人说决策是智能，也有人说自适应能力是智能，学习是智能等等【1-2】。这种现象说明人们能对智能的本质尚没有认识清楚。

关于智能，首先要认清自然智能，生物智能，然后才是人工智能。人们普遍认为生物具有智能，人类是目前地球上最具智慧的生物，而人工智能是要让机器像人那样有智能。所以要探讨智能的本质，首先针对生物智能的本质，探讨生命系统的底层逻辑，为什么生命具有智能？智能对生命的意义和价值？生命系统是一种远离平衡态的自组织、自生成（复制），自适应、活的物理信息系统，具有不断演化能力。现代物理学认为物质与信息是统一的，世界是由各种物理信息系统组成的，但生命是一种独特的存在。

生命（体）系统作为一种特殊的物理信息系统遵循下面两条基本原理：

（1）最小自由能原理，（2）最大信息量原理。

最小自由能原理是指一个体系处于平衡时，自由能最小【3】。生命作为一个具有边界的独立体系，维持最小自由能就是不稳定的环境中尽量保持系统内部处于稳定的平衡状态。最大信息量原理是指作为自组织、自复制、自适应的系统在自我变异演化时选择最大信息量【4】。这两条基本原理从能量和信息两个方面指引生命系统稳定存在和演化的方向，最大化信息和最小化能量两个对偶驱动力共同推进生命体稳定地演化发展。

2. 智能的实质

生命体为了生存与发展毕生都在设法获取能量和信息，并利用能量和信息维持生命体适应不断变化的环境，使其物理（能量）信息系统稳定并一直延续下去。为此，经过亿万年的演化，生命体使自己成了世界上最成功的能量与信息变换系统，这种能够将周围环境的物质（能量）信息转化为其自身需要的能量信息，经过自身的加工和利用再反馈到环境中的能力就是智能。所以，智能是生物体的基本能力和特征属性，是一种尽量用最小能量实现最大信息量，运用信息来适应环境、维持存在的能力。运用信息包括信息获取、记忆、计算和输出等信息处理过程【5-7】。

处于不同生态位的物种具有不同的智能，即使同一物种由于环境和自身演化的差异也会有一定的智能差异。为了计算和比较生物体的智能高低，有必要进一步分析能量、信息与智能的关系。

综上所述，能量和信息之间的转换与传递是生命的基本功能，智能与能量和信息加工转换的效率与效益直接相关。由于生命体获取能量和信息、计算和处理信息以及身体的运动、对外输出信息等所有活动，均需要消耗能量，生命体经过新陈代谢、血液循环等生化过程将获得的食物和营养物质以化学能、电磁能以及热能等形式供给各类活动必须的能量，实现能量的动态平衡，并尽力使自由能最小。根据能量守恒法则，生命体对能量的转换前后能量总体是不变的，即生命体从环境获取的能量，经过其吸收、利用后多以热量的形式排放到自然界，其总量并未有发生变化。只是能量的形态可能从化学能转变为电磁能、机械能、热能以及信息等不同的形态，其转换效率的高低取决于生命体的结构和代谢过程。对于同一物种来说其结构和代谢原理是一样的，转换的效率差异很小，只有自由能的

多少可能与生存环境有所差别。比如北极熊在极寒环境下需要较多的自由能以脂肪形式储存起来，而一般熊类可能不需要那么多自由能。

因此智能可能与信息获取、加工、处理的关系更加密切，生物体借助其各种感受器能够从环境中感受到事物的状态和变化信息，通过感知觉器官辨识、处理、理解信息，学习记忆各类事物，决策行动。在同样的环境中不同物种对信息的加工利用的能力和效率直接影响其生存能力和生态位，也就是说智能高低确定了动物生存能力和生态链的位置。比如人类是地球上最具智慧的生物，击败了所有其他动物，位于生态链的最顶端。

从物理上看，生命（体）系统是自然界一种活的能量和信息转换系统，生命的意义在于将转换的能量与信息再作用于物理世界，改变和影响自然。其转换和处理信息的效率和效益是智能的关键指标，而处理信息的快慢和能量消耗决定了信息加工的效率和效益。

注意：加工处理信息的效率和效益是两个不同的概念，高效率是速度快用时短；高效益是成本低，耗能少。从能量的消耗上看感受器获取信息、传输信息和加工信息、存储信息都需要能量，这些涉及信息的所有能量加到一起作为信息转换的能量，记为转换成本。

在大脑进化过程中，遵循信息量最大原则，脑容量不断增加，为快速处理信息奠定了物质基础。脑神经系统为了能快速处理与以往类似的信息，通过记忆和重用过去的经验信息提高信息处理效率，降低能量消耗。同时生命进化也遵循最小自由能原理，生物体的消耗能量和获取要尽量保持平衡，脑的耗能与生物体能量获取能力要相对均衡，脑容量过大会影响生存能力，所以脑容量指标不如脑体比更为合理。

在 DNA 的复制过程中不可能一点不出现差错，复制误差引起的变异，有利于种群的多样性，但也不能过大，会引起系统性崩溃。M. Eigen 在其超循环论中，据此建立了选择价值理论，在分子层次上通过实验模拟和理论证明，生命系统的演化是一个选择价值不断优化，趋于最大信息量的过程【8】。与基因的复制类似，脑神经系统记忆的信息强度会随着时间衰退降低记忆的准确度，记忆的误差不利于以往经验的利用，但是可能对创新有利，增加了新思维途径。德国心理学家艾宾浩斯经过研究发现脑神经系统存在一定的规律，总结出一遗忘曲线【9】，如图 1 所示。这个曲线表明记忆的准确性随着时间逐渐降低。为了有效利用脑的信息记忆和处理能力，适应和感知周围环境的变化，生命体要不断获取新信息，同时通过反复学习，最大限度地记住有价值的信息和经验。因此，生命对新事物充满了好奇心，喜欢新信息，同时建立了一套新老信息融合的学习机制，比如，贝叶斯公式是这种机制的一种数学表示之一。

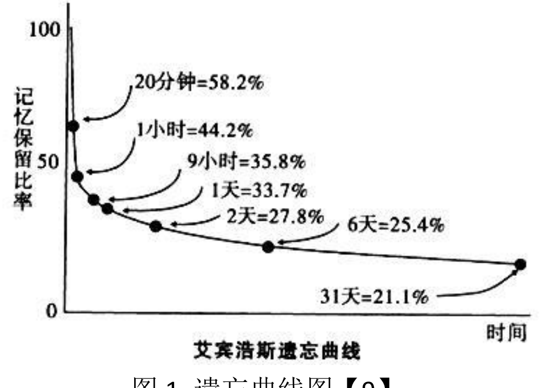


图 1 遗忘曲线图【9】

3. 智能的测度

假设 G 为生命（智能）体具有智能 W，生命（体）G 作为能量 E 和信息 I 之间的转换系统，记为 E、I 变量的函数，如果不考虑生命的目的性，则智能 W 是其获取和运用信息的能力（从能量和信息的关系看，是一种将环境的物质能量信息转换到生命体，再由生命体转换到周围环境的能力）。可以表示为：W=G（E，I），其中，E 为生命体汲取和处理信息消耗的能量，I 为获得和处理的信息及转换到环境的信息。生命体除了输出必要的能量和维持自身有机体稳定外，其能量消耗主要用于处理信息，包括感知信息，记忆和加工（计算）信息以及输出信息等。

注意：这里的 I 是指感知器获取的新信息或有效信息。因为陈旧和无效信息对生命无价值，浪费资源和能量，是生命系统尽量避免的。

假设单位时间 t 内，生命体处理的信息量为 I，消耗的能量为 E，W 就是单位时间生命体 G 获取和加工信息的能力。根据最小自由能和最大信息量原理，生命体消耗的能量越少越好，处理的信息量越大越好，其智能越高，所以 W 与 E 成反比，与 I 成正比，其智能为：

$$W=G（E，I）= \alpha I/E \qquad （1）$$

其中，α与生物类别、环境和目标等因素有关，在计算时一般作为一个常量，取【0-1】区间的一个数值。如果考虑时间的话，可认为 W 为 G 在单位时间的能量与信息的转换能力。

若考虑能量信息处理顺序包括输入、计算、输出等步骤与过程，则

$$W=W_1+W_2+W_3 \qquad （2）$$

其中，W_1，为输入智能， W_2 为计算存储加工智能， W_3 为输出智能；对应为感知智能，决策计算智能和行为智能等。

把（1）代入（2），有

$$W = G（E，I）= \alpha \sum_{j=1}^{3} \frac{I_j}{E_j} \qquad （3）$$

上面的计算没有考虑转换的效率，如果考虑信息处理消耗的时间因素 t，且不同时段消耗和处理的信息量不同，E 和 I 是时间 t 的函数，计算动态转换的效率，假定计算某时间段的智能，从起始时间 t_0，到时间 t_1 结束，该时间段的智能和除以 $T=t_1-t_0$, 是该时间段的平均智能。

$$W = \int_{t_0}^{t_1} f(E,I,t)dt = \int_{t_0}^{t_1} (\frac{\partial G}{\partial E}\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial I}\frac{\partial I}{\partial t})dt \qquad （4）$$

其中，$f(E,I,t) = \frac{\partial G}{\partial E}\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial I}\frac{\partial I}{\partial t}$，是 G 函数对 E、I 的时间 t 微分。

$\overline{W} = W/T$，为 T 时段的平均智能。比如人在出生到小学，从少儿到青年，等

等不同时期的智能会有些差异，也可能是智能体在时间 $T=t_1-t_0$，完成某项任务时的平均智能。

如果把生命体对某任务完成情况作为智能的重要指标，则可以在计算 W 时，对α系数根据完成的程度，设置不同的权值，比如未完成为 0，或 0.1；完成一半，为 0.5；完成为 1.等。

4. 物质、能量与信息的关系

自然世界是由物质能量和信息组成的，在自然状态下，三者相互交织在一起，物质包含能量信息，物质可转化为能量，能量也可以转化为物质。自然信息作为物质运动的状态表征是无法脱离物质的，也不能独立存在，但是生命却能把信息从物质（能量）的包含中分离出来并加以利用。生命作为自然界的一部分，也是由物质（能量）信息组成的，但是其有机体是依赖物质能量的序关系-信息构建起来的，所以生命体自诞生起就具有获取信息和利用信息的能力，即智能。从物质能量和信息关系角度看，生命是一种物质能量与信息相互转换的媒介与操控者。生命依靠其独特的感受器和信号处理系统，把环境的物质能量状态和变化提取出来，以此来认知世界，并且能利用信息和能量改造和生产新的物质（能量）。实现了物质（能量）与信息之间的转换。

根据公式（1）W=α I/E，有 EW=α I， 如果取α=1，则 EW= I， 则可以计算能量 E 和信息 I 之间的转换，W 为能量信息的转换因子。

2019 年 Melvin M. Vopson【10】给出了物质能量和信息的三者之间的等价关系，见图 2。

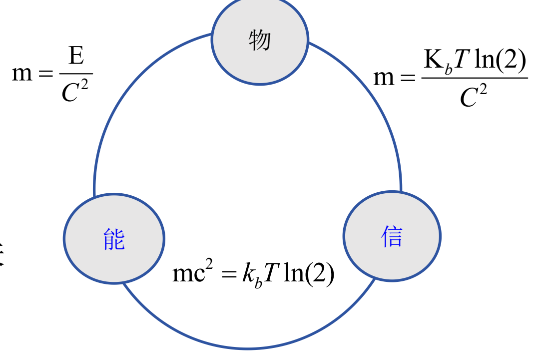


图 2.物质能量和信息的等价

其中，根据爱因斯坦的质能关系式 $E=MC^2$，物质能量可相互转换。能量与信息的关系为 $mc^2=k_bT\ln(2)$，其中，T=300K, C 为光速，K_b 为信息，单位为比特，m 为质量单位 Kg。经计算 1 比特信息对应质量约 3.19×10^{-38} Kg。

注意：这个数据依据的是删除或存储 1 比特信息需要消耗能量，并不是真正的能量与信息直接转换，这点上与质能的转换途径是不一样的。

根据质能换算公式，将 1 比特信息对应能量为：

$3.19\text{x}10^{-38}\text{x}3^2\text{x}10^{10}/(300\ln(2))=2.871\text{x}10^{-27}/207.944=1.38\text{x}10^{-29}$ 焦耳，这是 1 比特信息对应能量消耗的下界。

因为智能是信息/能量，那么：

$$\omega=1/1.38\text{x}10^{-29}=7.243\text{x}10^{28}\text{bit/J}$$ 是智能的上界。

从能量-信息转换角度看，$7.243\text{x}10^{28}$ 为智能的最大极限值，这是理论上的单一能量信息转换的极限值。实际上，信息作为能量或物质的状态和变化表征，有各种各样的表现形式，如热量、频率、光、电、磁场等，生命体在各种复杂的环境中获取不同的、变化的时空信息，绝对不是一项简单的任务，虽然亿万年的进化演化出了各种各样复杂的智能，但自然生命体的智能与理论极限相差甚远。

为了便于智能计算与应用，将常量ω引入到公式（1），作为物质能量–信息

变换的基本常数，则 W=βα I/E，β=1/（8x7.243x10^{28}）=0.17258.x10^{-30}(J/Byt), 其中 Byt 为字节，1Byte=8Bit，J 为焦耳，1 焦耳为 1 瓦特秒，经过这样的换算后，智能 W=0.17258x10^{-30}α I/E ,其中，I 为信息量以字节 Byt 为单位，E 为能量以焦耳 J 为单位，W 为智能，无量纲单位。因为β的单位为 J/Byt 与 Byt/J 刚好抵消。进一步考虑 1.0x10^{-30} 太过渺小作为宇宙常数，无法实际应用，故在具体计算智能时略去不考虑，只取数值 0.17258 作为日常智能测度的计算公式如公式（5）：

$$W=0.17258\,\alpha\, I/E \qquad （5）$$

注意：按公式 5 计算出来的是一个相对的智能指数，没有量纲。

物质、能量和信息虽然在物理上存在密切的联系，并存在某种等价关系，但是，质量与能量通过自然界和人工制造的核反应可以实现相互转换，而能量和信息尚未发现独立的两者相互转换的例子，只有通过智能体才能实现信息与能量、物质之间的分离与转换，其中智能是物质能量与信息转换能力，智能依赖智能体，是智能体的基本属性特征。智能体要尽可能地降低最小自由能增大信息量，增加信息处理的效率和效益，不断地从效率和效益两方面优化智能体的能量-信息转换机制。

5. 结论

本文在深入分析智能的实质基础上，提出了智能是物质能量与信息的转换能力这一新观点，进一步提出了智能的测度计算方法、平均智能、综合智能等新概念，最后讨论了物质能量与信息的定量转换关系，指出了智能的上界和能量消耗的下界，并给出一个无量纲的智能测度计算公式。

智能测度可以用于判断和比较人工智能系统的智能程度，比如当前的大语言模型取得巨大成功，但是也消耗了巨大的能量和资源，似乎大模型的智能在很多领域超过了人类，但是如果计算一下其智能指标，会发现与人类尚有很大距离。进一步智能的测度也为智能系统定量分析智能的高低给出了可行的计算方法，为人工智能的改进与发展提供了一个有意义的指引。

参考文献：

【1】李德毅，论智能的困扰和释放，智能系统学报，2024，19（1）：249=257

【2】王晓峰，杨亚东，基于生态演化的通用智能系统结构模型研究，自动化学报，2019-03-29

【3】Friston, K. (2010). The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, *11*(2), 127–138. https://doi.org/10.1038/nrn2787

【4】王晓峰，最大信息量是生命演化的基本原理，AI 与思维科学，公众号 2024.2

【5】王晓峰， 智能的本质，AI 与思维科学，公众号，2024.3

【6】王晓峰，基于需求演化的自我模型，第六届通用人工智能年会，2021 年 12 月 https://www.zhihu.com/zvideo/1459302427656245248?utm_id=0，

【7】Sun B, Wang X. The Model of an Explanation of Self and Self-Awareness based on Need Evolution. IFIP Advances in Information and Communication Technology series. 978-3-031-14902-3, ICIS 2022, IFIP AICT 659

【8】M. Eigen & P. Schuster, 曾国屏，沈小峰译，超循环论，上海译文出版社，1990 年

【9】Hermann Ebbinghau，曹日昌译，记忆，北京大学出版社 2014 年

【10】Melvin M. Vopson，"The mass-energy-information equivalence principle "，AIP Advances 9, 095206 (2019)，

https://doi.org/10.1063/1.5123794，